

永磁同步电机直接交轴磁链控制

杨建飞¹, 胡育文², 吴华仁¹, 杨继全¹

(1. 南京师范大学江苏省三维打印装备与制造重点实验室, 江苏 南京 210042)

(2. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016)

[摘要] 隐极式永磁同步电机转矩中定子磁链幅值和转矩角均为可控变量, 两者的共同作用效果即为交轴磁链. 以定子绕组星形连接的永磁同步电机为例, 提出了一种通过控制交轴磁链实现对电机转矩直接控制的方法. 该方法直接根据转矩控制要求选择优化的电压矢量实现对电机交轴磁链的控制, 不要求保持定子磁链幅值恒定, 不需要复杂的坐标变换. 仿真结果验证了理论分析的正确性和控制方法的可行性.

[关键词] 永磁同步电动机, 交轴磁链, 空间电压矢量, 直接转矩控制

[中图分类号] TM761 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2014)03-0001-06

Direct Q-Axis Flux Linkage Control for Permanent Magnet Synchronous Motor

Yang Jianfei¹, Hu Yuwen², Wu Huaren¹, Yang Jiquan¹

(1. Jiangsu Province 3D Printing Equipment and Manufacturing Key Lab, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. College of Automatic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The amplitude of stator flux linkage and torque angle are controllable variables in non-salient pole permanent magnet synchronous motor, and the interaction effect of stator flux linkage amplitude and torque angle is Q-axis flux linkage. Taking the permanent magnet synchronous motor with Y connected stator winding for example, a novel direct torque control method through the control of Q-axis flux linkage is presented. This method selects the required voltage vector according to the torque control requirement directly without constant stator flux linkage amplitude control and complex coordinate transformation. The correction and feasibility of the proposed method are verified by the simulation results.

Key words: permanent magnet synchronous motor, Q-axis flux linkage, space voltage vector, direct torque control

传统永磁同步电机直接转矩控制(direct torque control, DTC)方法通过定子磁链和电机转矩双闭环控制实现对电机转矩的有效控制^[1,2], 由于在实现良好动态性能的同时具有结构简单、鲁棒性好等特点而受到广泛关注^[3-9]. 对于永磁同步电机而言, 其定子磁链幅值和转矩角均是可控变量, 因此, 实现转矩直接控制的方法多种多样. 从国内外对永磁同步电机 DTC 的研究成果可知, 很多借鉴了文献[1]的控制思想, 采用定子磁链和转矩的双闭环结构来实现对电机转矩的直接控制. 而在永磁同步电机电磁转矩中, 定子磁链和转矩角的共同作用效果即为电机交轴磁链, 文献[10]以定子绕组为三角形连接的永磁同步电机为研究对象, 对此进行了分析和验证.

本文以常用的定子绕组为星形连接的永磁同步电机为研究对象, 详细分析了定子绕组星形连接条件下电压矢量对电机转矩和定子磁链的作用规律, 提出了一种永磁同步电机直接交轴磁链控制方法, 该方法根据转矩控制要求选择合适的空间电压矢量实现对电机交轴磁链的直接控制, 实现过程中不要求保持定子磁链幅值恒定, 不需要复杂的旋转坐标变换.

收稿日期: 2014-05-16.

基金项目: 国家自然科学基金(51407095)、江苏省高校自然科学基金(12KJB470011、13KJB590001).

通讯联系人: 杨建飞, 博士, 讲师, 研究方向: 电力电子与电力传动、三维打印. E-mail: yjfsmile@njnu.edu.cn

1 直接交轴磁链控制方法基本原理

1.1 转矩控制方法分析

对永磁同步电机的控制本质上是对其转矩的控制,直接转矩控制方法将电机和逆变器作为一个整体,直接将电机转矩作为控制对象,进而实现对电机的高性能控制.而对电机转矩的控制最终归结到对空间电压矢量的选择上.对于星形连接的永磁同步电机而言,其定子磁链和6个运动空间电压矢量的分布如图1所示.其中, $\alpha\beta$ 为两相静止坐标系; dq 为转子磁链同步旋转坐标系; xy 为定子磁链同步旋转坐标系; ψ_s 为定子磁链矢量,其和 α 轴的夹角为 θ_s ; ψ_r 为转子磁链矢量,其和 α 轴的夹角为 θ_r ;定转子磁链之间的夹角为 δ ; $u_1 \sim u_6$ 分别为6个运动空间电压矢量.

对于隐极式永磁同步电机,其转矩如式(1)所示,

$$T_e = \frac{3p}{2L_s} |\psi_s| \psi_f \sin\delta = \frac{3p}{2L_s} \psi_{sq} \psi_f, \quad (1)$$

其中, L_s 为电机定子电感; ψ_{sq} 为电机交轴磁链; p 为电机极对数; T_e 为电机转矩; ψ_f 为转子永磁体磁链.直接转矩控制方法以电机转矩作为直接控制对象,为便于考察电机转矩的变化情况,对式(1)中的电机转矩求微分,如式(2)所示:

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{3p}{2L_s} \psi_f \frac{d\psi_{sq}}{dt}. \quad (2)$$

从式(2)可知,在电机参数一定的条件下,电机转矩的变化直接正比于交轴磁链的变化,因此,通过控制电机交轴磁链就能够实现对电机转矩的有效控制.而对定子磁链的控制最终归结为如何选择合适的电压矢量.在永磁同步电机中,电压矢量和定子磁链矢量之间的关系如式(3)所示,其中 u_s 为电压矢量, R_s 为定子电阻, i_s 为定子电流矢量:

$$u_s = \frac{d\psi_s}{dt} + R_s i_s. \quad (3)$$

从式(3)可知,如果忽略定子电阻压降,则定子磁链矢量的变化总是和所施加的运动电压矢量方向保持一致.根据这一变化规律同时结合电机转矩变化和交轴磁链变化的关系可知,当需要迅速改变电机转矩时,应选择使定子磁链交轴分量变化最快的空间电压矢量.为实现对电机转矩的有效控制,从式(2)和式(3)可知,电压矢量的选择取决于其交轴分量的大小.从图1可知,当转子磁链位置变化时,电压矢量交轴分量也会随之变化.取电压矢量幅值为1V,逆时针方向为参考方向,则各个电压矢量交轴分量随转子位置变化情况如式(4)所示,其中, u_{1q} 为电压矢量 u_1 的交轴分量,其他类推:

$$\begin{aligned} u_{1q} &= \sin(-\theta_r), \\ u_{2q} &= \sin(60^\circ - \theta_r), \\ u_{3q} &= \sin(120^\circ - \theta_r), \\ u_{4q} &= \sin(180^\circ - \theta_r), \\ u_{5q} &= \sin(240^\circ - \theta_r), \\ u_{6q} &= \sin(300^\circ - \theta_r). \end{aligned} \quad (4)$$

从式(4)可知,每个电压矢量交轴分量均是转子磁链位置的函数,为便于比较分析,将其示于图2中.

从图2电压矢量交轴分量的变化规律可知,在 $0 \sim 2\pi$ 范围内,转子磁链角度被平均分成6个扇区,在每个扇区内均存在一个交轴分量最大的电压矢量和一个交轴分量最小的电压矢量.根据这一变化特点,同时结合式(2)和式(3),即可得到

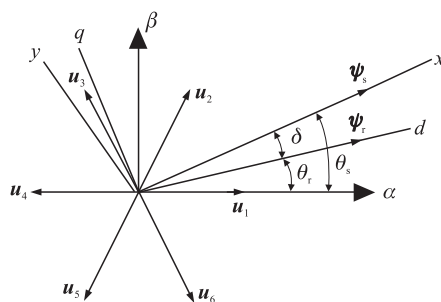


图1 星形连接永磁同步电机定转子磁链和电压矢量示意图

Fig.1 Illustration of stator, rotor flux linkage and voltage vector for star-connection PMSM

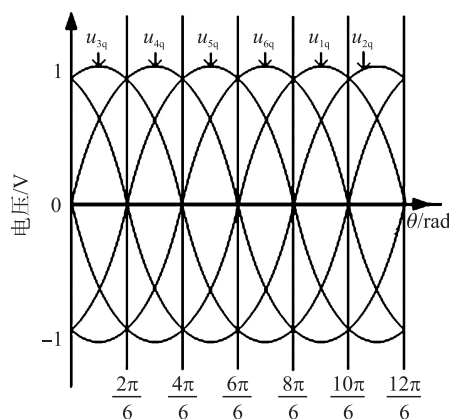


图2 电压矢量交轴分量随转子位置变化

Fig.2 D-axis voltage vector VS rotor position

直接交轴磁链控制下电压矢量的选择依据. 以 $0 \sim 2\pi/6$ 范围为例,当需要迅速增加电机转矩时,应选择最优电压矢量 u_3 ;当需要迅速减小电机转矩时,应选择最优电压矢量 u_6 ;其他扇区内电压矢量的选择可依此得到. 据此,可得到整个范围内电压矢量选择如表 1 所示. 其中, τ 为转矩控制标志, τ 为 1 时表示需要增加转矩; τ 为 0 时表示需要保持转矩; τ 为 -1 时表示需要减少转矩.

表 1 转矩控制模式下电压矢量选择表

Table 1 Voltage vector selecting table under torque control mode

τ	θ_r					
	$0 \sim \frac{2\pi}{6}$	$\frac{2\pi}{6} \sim \frac{4\pi}{6}$	$\frac{4\pi}{6} \sim \frac{6\pi}{6}$	$\frac{6\pi}{6} \sim \frac{8\pi}{6}$	$\frac{8\pi}{6} \sim \frac{10\pi}{6}$	$\frac{10\pi}{6} \sim \frac{12\pi}{6}$
1	u_3	u_4	u_5	u_6	u_1	u_2
0	$u_0(u_7)$	$u_0(u_7)$	$u_0(u_7)$	$u_0(u_7)$	$u_0(u_7)$	$u_0(u_7)$
-1	u_6	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5

从表 1 可知,在电机控制过程中,根据转子磁链所处的扇区位置,同时结合转矩控制要求选择合适的电压矢量作用于电机,即可实现对电机转矩的有效控制. 实现过程中不要求严格的转子位置信息,仅需要知道其所处扇区位置即可,也不涉及复杂的旋转坐标变换,简化了系统的控制结构. 为便于分析,本文将这种控制方法称为直接交轴磁链控制方法.

1.2 磁链限幅方法分析

前一小节主要从转矩控制的角度出发对电压矢量的选择依据进行了分析,侧重研究了电压矢量对定子磁链交轴分量的影响,但没有涉及这种转矩控制方法下定子磁链直轴分量的变化规律的分析. 需要指出的是,虽然没有进行分析,但电压矢量对定子磁链直轴分量的影响是客观存在的. 控制过程中,如果忽略这种影响,将会导致定子磁链幅值的不可控. 如果磁链幅值过大将会导致定子绕组饱和,最终影响电机的稳定运行. 因此,在直接交轴磁链控制方法中必须引入定子磁链的限制方法. 要实现对定子磁链幅值的迅速控制同时还要兼顾转矩的控制要求,在定子磁链同步旋转坐标下分析限幅时电压矢量的选择依据是合适的. 对于定子绕组星形连接的永磁同步电机,各个电压矢量在 x 轴方向和 y 轴方向的分量如式(5)、式(6)所示,其中 u_{1x} 为电压矢量 u_1 在 x 轴方向的分量, u_{1y} 为电压矢量 u_1 在 y 轴方向的分量,其他依此类推:

$$\begin{aligned} u_{1x} &= \cos(-\theta_s), \\ u_{2x} &= \cos(60^\circ - \theta_s), \\ u_{3x} &= \cos(120^\circ - \theta_s), \\ u_{4x} &= \cos(180^\circ - \theta_s), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} u_{5x} &= \cos(240^\circ - \theta_s), \\ u_{6x} &= \cos(300^\circ - \theta_s), \\ u_{1y} &= \sin(-\theta_s), \\ u_{2y} &= \sin(60^\circ - \theta_s), \\ u_{3y} &= \sin(120^\circ - \theta_s), \\ u_{4y} &= \sin(180^\circ - \theta_s), \\ u_{5y} &= \sin(240^\circ - \theta_s), \\ u_{6y} &= \sin(300^\circ - \theta_s). \end{aligned} \quad (6)$$

在定子磁链同步旋转坐标系中,电压矢量的 x 轴方向分量决定了定子磁链幅值的变化, y 轴方向分量决定了定子磁链角度的变化,也即间接改变了转矩角的大小. 为便于比较,将两者的变化情况示于图 3.

从图 3(a)可知,根据电压矢量 x 轴方向分量的变化规律,可将 $0 \sim 2\pi$ 范围内定子磁链角度平均分成 6 个扇区,且每个扇区内均存在一个 x 轴方向分量最大的电压矢量和一个 x 轴方向分量最小的电压矢量. 以 $\pi/6 \sim 3\pi/6$ 范围为例,当需要减小定子磁链幅值时,可选电压矢量为 u_4 、 u_5 和 u_6 ,而在磁链限幅过程中还需要考虑转矩的控制要求. 因此,限幅条件下,若需要增加转矩,则选择使定子磁链幅值减小,同时根据图 3(b)的变化规律选择使定子磁链角度增加的电压矢量 u_4 ;若需要减小转矩,则选择电压矢量 u_6 ;若需要保持转矩,则选择电压矢量 u_5 ;其他扇区内电压矢量的选择可依此得到. 最终得到如表 2 所示的磁链限

幅条件下电压矢量选择依据,其中 ε 为转矩控制标志, ε 为 1 要求增加转矩, ε 为 0 要求保持转矩, ε 为-1 要求减小转矩。

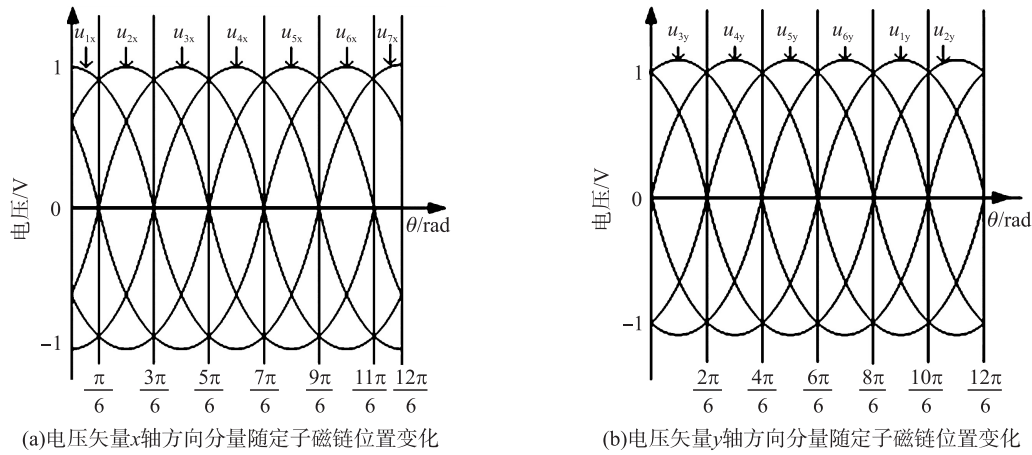


图 3 电压矢量分量随定子磁链位置变化情况
Fig. 3 Voltage vector components VS stator flux linkage position

表 2 磁链限幅模式下电压矢量选择表

Table 2 Voltage vector selecting table under flux linkage amplitude limitation mode

ε	θ_s					
	$-\frac{\pi}{6} \sim \frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{6} \sim \frac{3\pi}{6}$	$\frac{3\pi}{6} \sim \frac{5\pi}{6}$	$\frac{5\pi}{6} \sim \frac{7\pi}{6}$	$\frac{7\pi}{6} \sim \frac{9\pi}{6}$	$\frac{9\pi}{6} \sim \frac{11\pi}{6}$
1	u_3	u_4	u_5	u_6	u_1	u_2
0	u_4	u_5	u_6	u_1	u_2	u_3
-1	u_5	u_6	u_1	u_2	u_3	u_4

根据前面的分析结果可知,在采用直接交轴磁链控制方法时,仅需知道定子磁链所处的扇区即可,运行过程中根据定子磁链幅值的大小选择不同的电压矢量选择表,根据转矩控制要求选择合适的电压矢量作用于电机即可实现对电机转矩的直接控制,控制过程中不涉及复杂的旋转坐标变换,对定子磁链的位置信息要求不高。

2 仿真分析

为了验证所提出的直接交轴磁链控制方法的正确性,利用 Matlab 软件分别建立了传统 DTC 方法和直接交轴磁链控制方法仿真模型。电机参数如表 3 所示,采用传统 DTC 时,定子磁链给定为 0.2 Wb,在直接交轴磁链控制方法中,定子磁链限幅值为 0.2 Wb,系统控制周期 60 μ s。

2.1 电机稳定运行性能仿真

电机在给定转速 3 000 r/min 时,分别采用传统 DTC 和直接交轴磁链控制方法,运行于空载、半载和满载条件下,此时两种控制方法下电机定子磁链轨迹和转矩波形分别如图 4 和图 5 所示。

从两种控制方法不同负载条件下的定子磁链轨迹可知,传统 DTC 由于要保持定子磁链幅值恒定,因此,其磁链轨迹为一圆形,且不随着负载的变化而变化。而在直接交轴磁链控制方法中,对定子磁链的幅值没有特殊要求,仅要将其限制在一定范围内即可,从而简化了控制系统结构。从仿真结果来看,虽然定子磁链幅值会随着负载的变化而变化,但始终没有超出限幅值,验证了所提方法的正确性和限幅方法的有效性,由于不要控制定子磁链幅值恒定,从而简化了系统控制结构。此外,对比两种控制方法下的磁链轨迹可知,新控制方法在每个扇区内磁链轨迹近似为一条直线。而根据电压矢量和定子磁链轨迹之间的关系可

表 3 永磁同步电机参数

Table 3 Parameters of PMSM

电机参数	数值
母线电压/V	300
额定转速/(r/min)	3 000
定子电阻/ Ω	18.7
直轴电感/H	0.026 82
交轴电感/H	0.026 82
转子磁链/Wb	0.171 7
电机极对数	2
额定转矩/(N·m)	0.8

知,在每个扇区内要实现圆形磁链轨迹相比于近似直线的磁链轨迹,需要更多的电压矢量来实现.因此,新控制方法能有效减少电压矢量的使用次数,从而降低逆变器的开关损耗,提高系统效率.

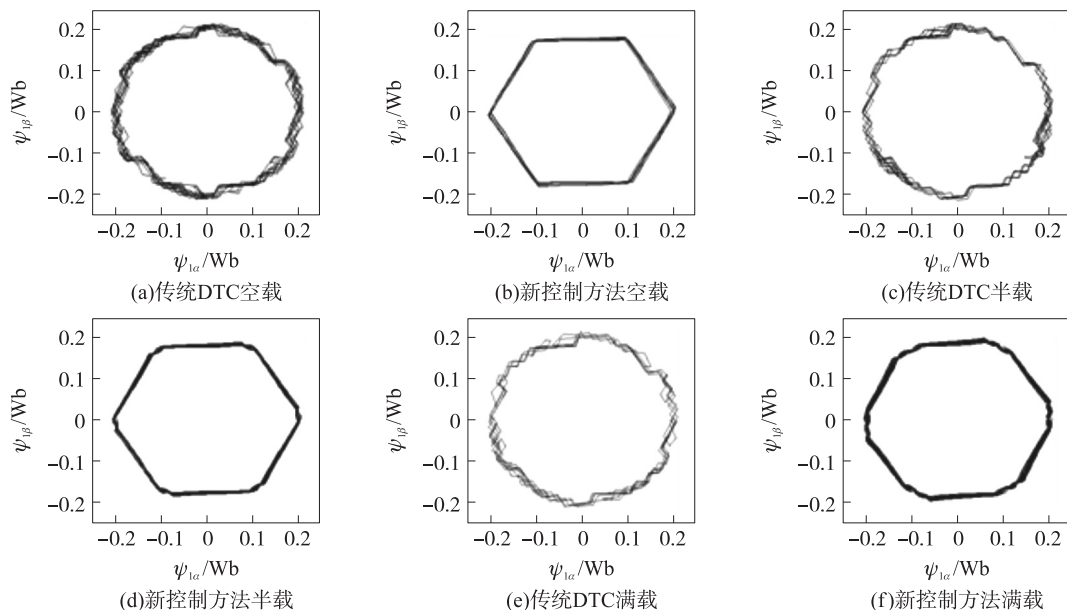


图4 不同控制方法下定子磁链轨迹

Fig. 4 Stator flux linkage locus under different methods

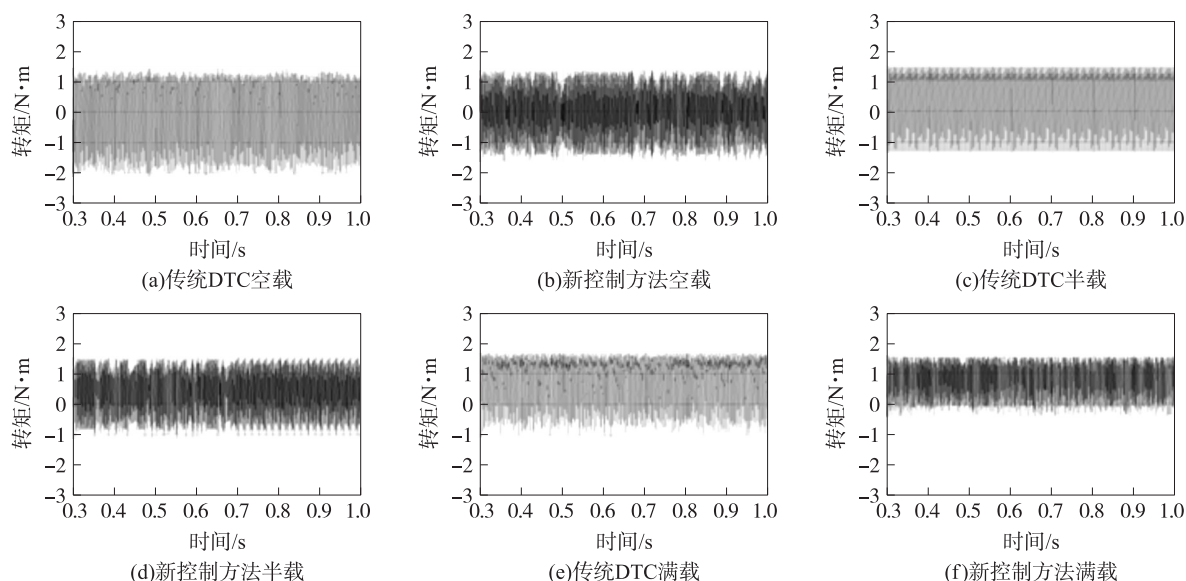


图5 不同控制方法下电机转矩波形

Fig. 5 Torque waveforms under different methods

从不同控制方法稳态运行条件下的转矩波形来看,传统 DTC 在空载、半载和满载时的转矩脉动分别为 $3.53 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $2.74 \text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $2.68 \text{ N}\cdot\text{m}$;而在直接交轴磁链控制方法中,其对应的转矩脉动分别为 $3 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $2.64 \text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $1.94 \text{ N}\cdot\text{m}$,均小于传统 DTC 控制方法下的转矩脉动.这主要是由于直接交轴磁链控制方法仅以转矩作为直接的控制目标,控制过程中不需要控制磁链幅值,能够实现对转矩的优化控制,进而保证了更好的稳态性能.

2.2 电机动态性能仿真

在稳态性能仿真的基础上,对两种控制方法的动态性能进行仿真对比分析,当在 0.1 s 突加给定转矩 $0.8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,不同控制方法下转矩响应波形如图 6 所示.

从动态仿真结果来看,传统 DTC 控制方法转矩响应时间约为 0.4 ms ,而在直接交轴磁链控制方法下

转矩响应时间约为 0.3 ms, 后者的响应时间要短于前者. 对比两种控制方法的控制思想可知, 传统 DTC 在转矩控制过程中还需要控制磁链幅值, 而转矩和磁链的控制均需要由电压矢量来实现, 磁链的控制过程必然对转矩的控制产生影响, 无法实现对转矩的优化控制; 而直接交轴磁链控制方法仅根据转矩控制要求来选择合适的电压矢量, 从而能够实现转矩的优化控制, 体现在动态性能上, 即具有更短的转矩响应时间.

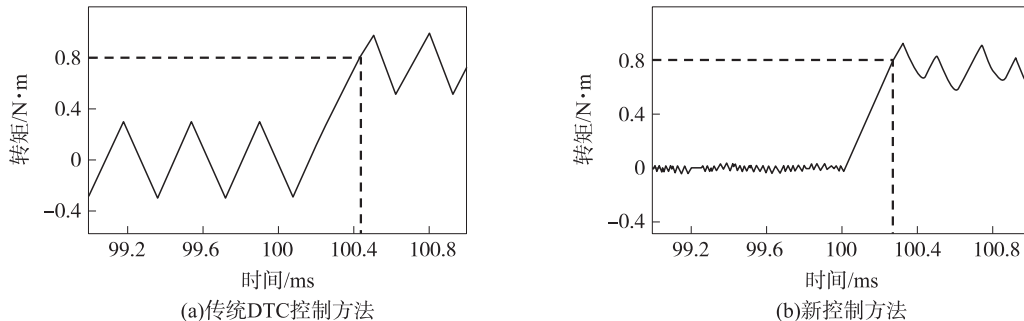


图6 不同控制方法下转矩响应波形

Fig. 6 Torque dynamic waveforms under different methods

综合前述的仿真结果可知, 本文提出的直接交轴磁链控制方法不要求定子磁链幅值恒定, 相比于传统 DTC 控制方法, 在具有较低转矩脉动的同时实现了电机具有良好的动态性能.

3 结语

在永磁同步电机直接转矩控制过程中, 保持定子磁链幅值恒定不是必须的, 由于定子磁链幅值和转矩角均为可控变量, 综合运用二者的共同作用效果能够实现对电机转矩的更好控制. 以常用的定子绕组星形连接的永磁同步电机为研究对象, 提出了一种直接交轴磁链控制方法, 电机运行过程中直接根据转矩控制要求选择电压矢量, 仿真结果表明所提出的控制方法使得电机具有良好的动静态性能, 对永磁同步电机高性能控制方法的研究具有借鉴意义.

[参考文献] (References)

- [1] Zhong L, Rahman M F, Hu Y W, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(3): 528-535.
- [2] Zhong L, Rahman M F, Hu Y W, et al. A direct torque controller for permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 637-642.
- [3] 孙丹, 贺益康. 基于恒定开关频率空间矢量调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 112-116.
Sun Dan, He Yikang. Space vector modulated based constant switching frequency direct torque control for permanent magnet synchronous motor[J]. Proceeding of the CSEE, 2005, 25(12): 112-116. (in Chinese)
- [4] 童克文, 张兴, 张昱, 等. 基于新型趋近律的永磁同步电动机滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 102-106.
Tong Kewen, Zhang Xing, Zhang Yu. Sliding mode variable structure control of permanent magnet synchronous machine based on a novel reaching law[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 102-106. (in Chinese)
- [5] 徐艳平, 钟彦儒. 扇区细分和占空比控制相结合的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 102-108.
Xu Yanping, Zhong Yanru. Sectors subdivision and duty ratio control combined direct torque control for permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 102-108. (in Chinese)
- [6] 邱鑫, 黄文新, 杨建飞, 等. 一种基于转矩角的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 56-62.
Qiu Xin, Huang Wenxin, Yang Jianfei, et al. A direct torque control strategy on torque angle for permanent magnet synchronous motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 56-62. (in Chinese)

(下转第14页)

- [22] Ma Gang, Wu Kehe, Zhang Tong, et al. A Flexible Policy-Based Access Control Model for Workflow[J]. Electric review, 2012, 88(3b): 67-71.
- [23] 孙才新, 陈伟根, 李俭, 等. 电器设备油中气体在线监测与故障诊断技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 239-241.
Sun Caixin, Chen weigen, Li Jian, et al. Gis Monitoring On-Line and Fault Diagnosis Technology Electric Equipment[M]. Beijing: Science Press, 2003: 239-241. (in Chinese)
- [24] 国家质量监督检验检疫总局. GB7252—2001 标准变压器油中溶解气体分析和判断导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
AQSIQ. GB7252—2001 Guide to the Analysis and the Diagnosis of Gases Dissolved in Transformer Oil[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [25] 马刚. 输变电设备在线状态分析与智能诊断系统的研究[D]. 北京: 华北电力大学控制与计算机工程学院, 2013.
Gang Ma. Research on Power Transmission and Transformation Equipment Online Status Analysis and Intelligent Diagnosis System[D]. Beijing: School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, 2013. (in Chinese)
- [26] 廖怀东. 变压器油色谱分析及故障判断[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 112-113.
Liao Huaidong. Oil chromatographic analysis and fault dagnosis for transformers[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1): 112-113. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]

(上接第6页)

- [7] 周扬忠, 毛洁. 基于有效磁链概念的永磁同步电动机新型定子磁链滑模观测器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 152-158.
Zhou Yangzhong, Mao Jie. A novel sliding mode stator flux linkage estimator based on active flux principle for permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 152-158. (in Chinese)
- [8] 冯江华, 许峻峰. 永磁同步电机直接转矩控制系统转矩调节新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 151-157.
Feng Jianghua, Xu Junfeng. A new torque adjustment method of permanent magnet synchronous machines direct torque control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 151-157. (in Chinese)
- [9] 贾洪平, 贺益康. 一种适合 DTC 应用的非线性正交反馈补偿磁链观测器[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 101-105.
Jia Hongping, He Yikang. A new nonlinear perpendicular flux observer with compensation feedback suitable for DTC application[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 101-105. (in Chinese)
- [10] 杨建飞, 胡育文. 永磁同步电机最优直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 109-115.
Yang Jianfei, Hu Yuwen. Optimal direct torque control of permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27): 109-115. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]